

Rancang Bangun Sensor Polimer Serat Optik Untuk Pendeteksi Konsentrasi Ion Ca^{2+} Dalam Air

Imam Khambali¹, Endarko²

^{1,2} Jurusan Fisika, Fakultas MIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail : khambali12@mhs.physics.its.ac.id¹, endarko@physics.its.ac.id²

Abstrak

Telah dirancang sebuah sistem sensor serat optik untuk mendeteksi konsentrasi ion Ca^{2+} dalam air. Penulis menggunakan serat optik jenis plastik (POF) Autonics FTP-320-10 dengan garis tengah jaket 2,2 mm dan inti 0,98 mm dan *cladding* 0,02 mm. Perancangan sensor POF dilakukan dengan metode pengupasan *cladding* yang nantinya akan diganti dengan larutan uji yaitu larutan ion Ca^{2+} . Pengupasan dilanjutkan dengan etsa dengan larutan aseton 70%. Bagian POF yang terkupas disebut sebagai *sensor head*. Sistem disusun terdiri dari LED merah 650 nm sebagai sumber cahaya dan fototransistor BP1331 sebagai penerima. Data luaran sensor dihubungkan dengan sistem instrumentasi yang terdiri dari pengolah, penguat dan konversi digital (A/D). Larutan sampel logam yang dipakai adalah $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ dengan konsentrasi 0,1 M, 0,2 M, 0,3 M, 0,4 M, dan 0,5 M. Larutan sampel akan kontak langsung dengan inti serat, dan bertindak sebagai "*cladding* baru". Pengolahan hasil penelitian dilakukan dengan membuat grafik hubungan konsentrasi dan luaran sensor. Untuk melihat korelasi antara nilai absorpsi larutan terhadap tingkat konsentrasi dilakukan pengujian UV-vis Thermo Scientific GENESYS 10S. Puncak absorpsi maksimum pada beberapa variasi konsentrasi didapatkan pada panjang gelombang 300nm. Hasil pendeteksian konsentrasi ion logam Ca^{2+} dalam larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ untuk konsentrasi 0,25M dan 0,45M masing-masing didapat selisih sebesar 0,017M dan 0,031M.

Kata kunci : konsentrasi molar, serat optik plastik (POF), fototransistor.

I. Pendahuluan

Pelacakan ion logam penting dalam banyak aspek kehidupan misalnya toksikologi klinik, pengawas lingkungan, dan manajemen limbah industri. Permasalahan serius yang menerpa banyak negara di dunia akibat limbah eksplorasi tambang logam, dan insektisida pertanian. Permasalahan ini mempunyai banyak dampak kesehatan dan sosial-ekonomi, sehingga kita membutuhkan rangkaian sensor yang cepat, handal dan mempunyai ketepatan tinggi untuk secara berkelanjutan melacak dan memonitor tingkat logam beracun dalam tanah dan sumber daya air.

Salah satu cara yang digunakan untuk mendeteksi konsentrasi ion logam dalam air adalah dengan sensor serat optik atau *plastic optical fiber* (POF). Pemakaian POF karena mempunyai beberapa kelebihan diantaranya sederhana, murah, ringan, beroperasi pada cahaya tampak, lebih fleksibel, ketahanan dari derau elektromagnetik, mudah penanganan dan penyambungan (diameter POF adalah 1 mm dibandingkan 8-100 mm untuk kaca), menggunakan piranti uji yang sederhana dan tidak mahal, dan lebih aman daripada serat optik kaca

yang memerlukan sumber cahaya laser (Polishuck, 2006), (Peters, 2011).

Sensor POF yang memakai sumber cahaya LED merah dan penerima fotodioda telah digunakan untuk memonitor gas hidrogen Florida (HF) melalui *sensor head* sepanjang 10 cm yang dilapis tipis menggunakan *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD) yang dapat mendeteksi dengan konsentrasi bagian per milyar atau *part per billion* (ppb) (Ishtaiwi, 2014). Sebuah sensor POF telah digunakan untuk melacak konsentrasi campuran dalam cairan menggunakan variasi amplitudo sinyal terukur terhadap waktu yang beroperasi berdasar pada prosedur pengukuran *stepwise* meliputi penenggelaman, perendaman, pemunculan dan pengentasan dari medium uji (Borecki, 2007).

Sebuah studi tentang karakterisasi modulasi intensitas sensor POF telah dilakukan dengan cairan pemandu gelombang larutan garam dan larutan gula beragam konsentrasi berkaitan dengan pengukuran indeks bias tiap konsentrasi dengan refraktometer Abbe untuk mencari hubungan antara kenaikan konsentrasi terhadap kenaikan indeks bias dan kenaikan rugi daya (Venkatasubbaiah et al., 2013).

Perkembangan sensor serat optik juga digunakan untuk mendeteksi racun dan ancaman biologi dengan sumber cahaya Laser He-Ne 633 nm dan

penerima fotodetektor silikon (Newport 818 SL rentang panjang gelombang 400-1100 nm), memodifikasi *cladding sensor head* dengan larutan atau fase uap zat kimia tertentu yang akan mengubah sifat-sifat transmisi serat dan menghasilkan redistribusi daya mode dalam serat multimode (El-Sherif *et al.*, 2007).

Sensor POF digunakan untuk melacak konsentrasi ion-ion logam $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ dan $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ dengan sumber cahaya laser halogen ProLamp dan dianalisis spektrum keluaran dengan spectroradiometer (Ho *et al.*, 2012a). Sensor tersebut tidak praktis dan mahal sebab menggunakan sumber cahaya halogen (ProLamp) dan sebagai penerimanya digunakan ASD FieldSpec3 Hi-Res Spectroradiometer. Chaudhari dan Shaligram (2012) telah melakukan pengukuran konsentrasi larutan metanol (CH_3OH) dengan rentang konsentrasi dari 0 – 100% dengan menggunakan sensor serat optik berbasis modulasi intensitas dengan sumber LED merah dan LED biru. Sensor serat optik (POF) juga telah digunakan untuk melacak konsentrasi alkohol dalam beberapa merek minuman keras menggunakan sebuah LED hijau (panjang gelombang sekitar 530 nm) dan fotodiode sebagai sumber cahaya dan penerima (Morisawa and Muto, 2012a)

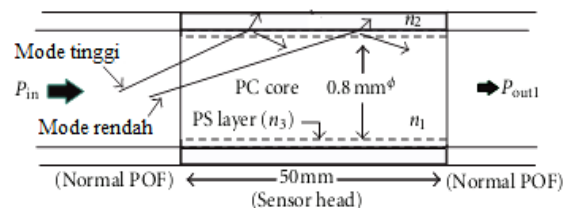
Pada penelitian ini penulis telah merancang dan membuat sebuah sensor berdasarkan pada penelitian Morisawa and Muto (Morisawa and Muto, 2012a; Morisawa and Muto, 2012b; Morisawa *et al.*, 1999). Bedanya dalam penelitian ini penulis menggunakan sebuah LED merah (panjang gelombang puncak 650 nm) dan sebuah fototransistor sebagai sumber cahaya dan penerima.

Prinsip kerja sensor serat optik berdasarkan pengukuran rugi daya pada bagian serat yang dibuka jaket dan *cladding*-nya. Pada bagian serat dengan panjang tertentu *cladding* sengaja dibuka agar terdapat rugi daya bocor. Bagian serat yang dibuka berfungsi sebagai *sensor head*. Dengan adanya rugi bocor maka terdapat perbedaan antara daya cahaya masukan pada satu ujung serat dengan daya cahaya luaran yang diukur pada ujung lainnya. Struktur *sensor head* ditunjukkan dalam Gambar 1, yang bertindak sebagai serat optik yang merugi ($n_i < n_2$) dan cahaya yang melaluinya akan mempunyai intensitas yang sangat rendah. Intensitas cahaya keluaran P_{out1} , dicari dengan metode pelacakan sinar (Morisawa and Muto, 2012b),

$$P_{out1} = \sum_{\theta=0}^{\theta_c} P(\theta) r(\theta)^m \quad (1)$$

dimana $P(\theta)$ adalah daya optik dari cahaya dengan sudut θ , θ_c adalah sudut kritis pada ujung sisi

masuk dari POF, $r(\theta)$ adalah koefisien daya yang dipantulkan dalam *sensor head*.

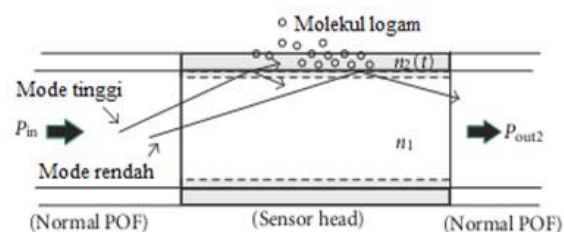


Gambar 1 Struktur inti POF bocor tanpa ion-ion logam $n_2 > n_1$ (Morisawa and Muto, 2012a).

Ketika dipancarkan kedalam larutan ion logam, indeks bias *cladding* menurun, menjadi lebih rendah dari indeks bias inti serat ($n_1 > n_2$). Ini menjadikan sensor head berubah menjadi POF terpandu sehingga intensitas cahaya keluaran meningkat dengan jelas. Total daya keluaran dari intensitas cahaya P_{out2}

$$P_{out2} = \sum_{\theta=0}^{\theta_{cs}} P(\theta) + \sum_{\theta=\theta_c}^{\theta_c} P(\theta) r(\theta)^m \quad (2)$$

dimana θ_{cs} adalah sudut kritis sensor head. Nilai dari P_{out2}/P_{out1} adalah perubahan relatif cahaya keluaran bergantung pada ion-ion logam dalam larutan. Keadaan ini ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2 Struktur inti POF terpadu dengan ion-ion logam $n_2(t) < n_1$

Keadaan yang ditunjukkan dari persamaan (1) dan (2), membuktikan bahwa sensor dapat untuk menanggapi larutan logam pada konsentrasi rendah. Perbedaan antara indeks bias awal *cladding* dan indeks bias awal inti yang diperlukan menurun sehingga peralihan dari mode rugi daya menjadi mode pandu gelombang menjadi mudah.

II. Pembahasan

2.1 Metode Penelitian

Prosedur penelitian mengenai sensor POF untuk melacak konsentrasi ion logam dalam air terbagi menjadi dua bagian yaitu perancangan sensor POF dan sistem instrumentasi. Perancangan sensor meliputi pemilihan serat optik, pengupasan *cladding* dan etsa serat optik, sedangkan perancangan sistem

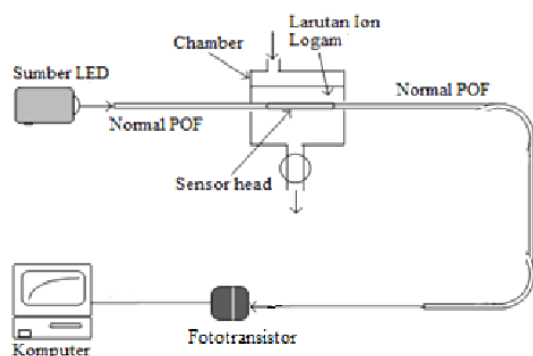
instrumentasi terdiri dari blok sistem sumber-penerima cahaya, blok pengolah analog dan blok penguatan menggunakan op-amp.

2.1.1 Perancangan Sensor POF

Serat optik yang digunakan dalam eksperimen ini adalah POF, buatan Autonics tipe FTP-320-10 dengan garis tengah 2,2 mm, garis tengah inti 9,8 mm dan garis tengah *cladding* 0,2 mm (Autonics, 2013). Ini adalah step-indeks POF multimode dengan nilai $n_{co} = 1,492$ dan $n_{cl} = 1,417$. Selisih indeks bias antara bahan inti dan *cladding*, $\Delta = 0,075$ sehingga didapat *numerical aperture* $NA = 0,578$ dan $\Theta_{max} = 35,31^\circ$ (Ziemann *et al.*, 2001).

Langkah pertama adalah memotong serat optik dengan panjang 190 mm sebanyak dua helai menggunakan alat potong yang disertakan pada produk. Kedua ujung serat yang dipotong dihaluskan dengan kertas gosok. Pada bagian tengah dari serat dibuka jaket dan *cladding* dengan panjang masing-masing 20 mm dan 50 mm. Karena inti serat terbuat dari PMMA dan *cladding* dari polistiren, maka bagian *sensor head* di-etsa menggunakan larutan acetone 70% selama 3 menit untuk menghilangkan *cladding* yang masih tersisa.

Bagian terbuka ini digunakan untuk melacak ion-ion logam dalam larutan. Kemudian POF disusun dengan meletakkan *sensor head* secara lurus dalam *chamber* plastik dengan satu sisi ujungnya diarahkan ke sumber cahaya (LED) sedangkan ujung lainnya diarahkan ke penerima (fototransistor) seperti ditunjukkan dalam Gambar 3. Sebuah *chamber* untuk menampung cairan yang akan dideteksi dibuat menggunakan kotak plastik ukuran 7cm x 7cm dengan ketinggian 5cm.



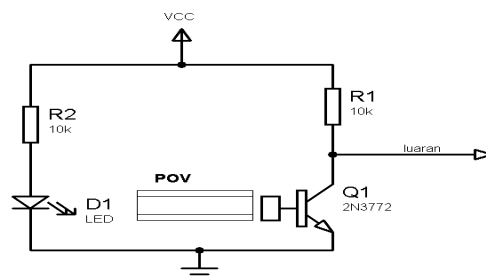
Gambar 3. Diagram skema susunan peralatan sensor serat optik yang digunakan dalam eksperimen

Pada penelitian ini sumber cahaya yang digunakan adalah LED merah BM1331 (Yellowstone, 2012) diberi tegangan 5000 mV dengan panjang gelombang pusat 650 nm, sedangkan penerima digunakan fototransistor BPT-BP1331 (Yellow Stone Corp, 2012). Pemilihan

sumber LED merah ini mempertimbangkan rugi (*loss*) kekuatan sinyal dalam serat optik yang disebabkan oleh adanya absorpsi dan hamburan cahaya. Kedua mekanisme rugi ini adalah fungsi panjang gelombang. Pada spektrum rugi ini dipilih jendela transmisi paling sempit yaitu 650 nm yang berada pada rentang cahaya tampak. Karena dalam pengukuran relatif tidak ada pergeseran suhu maka jendela 650 nm aman digunakan. Pada jendela 650 nm ini rugi transmisi sinyal 125 db/km atau 0,125db/m (Ziemann *et al.*, 2001), (Polishuck, 2006).

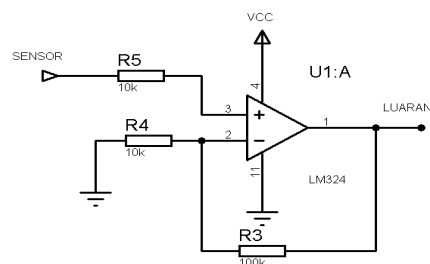
2.1.2 Perancangan Instrumentasi

Pada perancangan penelitian digunakan beberapa blok sistem instrumentasi. Blok terdiri dari sistem sumber-penerima cahaya, pengolah analog dan penguatan menggunakan op-amp. Instrumentasi analog dapat dipisah menjadi dua bagian yaitu pengolah sensor awal dan sistem penguat menggunakan OP-AMP. Pengolah sensor awal digunakan prinsip pembagi tegangan yang dapat ilustrasikan seperti pada Gambar 4 yang terdiri dari fototransistor dan resistor.



Gambar 4. Rangkaian pengolah sensor awal menggunakan fototransistor.

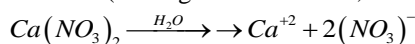
Pada sistem penguat digunakan tipe penguat dasar yaitu *non-inverting* menggunakan IC LM324. Penguatan dilakukan dengan intensitas 10 kali, sehingga didapatkan nilai luaran rangkaian penguat yang sebanding dengan masukan dari sensor. Bentuk rangkaian dasar penguat ditunjukkan seperti pada Gambar 5, yaitu kombinasi antara resistor dan LM324 sebagai sistem penguat *non-inverting*.



Gambar 5. Instrumentasi penguat *non-inverting* menggunakan LM324.

2.1.3 Penyiapan Bahan Uji

Pada percobaan ini penulis menggunakan bahan uji larutan logam senyawa Kalsium nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Pelarut untuk persiapan reagen adalah aquades (H_2O). Kedua senyawa yang digunakan adalah bersifat ionik, sehingga saat dilarutkan pada akuades akan terionisasi secara sempurna. Reaksi yang terjadi dapat ditunjukkan pada persamaan reaksi kimia (Ebbing and Gammond, 2009):



Pada penelitian digunakan variasi konsentrasi larutan dengan mengacu pada tingkat molaritas (M). Molaritas larutan merupakan perbandingan massa zat terlarut terhadap pelarut. Perhitungan konsentrasi larutan dirumuskan seperti pada persamaan (3).

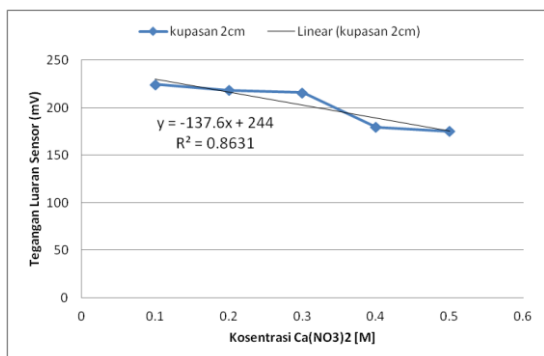
$$\text{Molaritas} = \frac{\text{massa mol}}{\text{volume}} \quad (3)$$

Konsentrasi larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ yang digunakan meliputi rentang 0,1M sampai dengan 0,5M. Larutan untuk kalibrasi menggunakan 0,1 M, 0,2M, 0,3M, 0,4M dan 0,5M, sedangkan untuk validasi menggunakan 0,25M dan 0,45M.

2.2 Pengujian Rancangan sistem sensor POF

2.2.1 Pengujian pada larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

Proses pengujian dilakukan untuk sensor dengan panjang *head* 2 cm dan 5 cm dengan cara mencelupkan dalam larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Hasil pengujian sensor dibuat grafik plot hubungan antara tegangan luaran (V_{out}) dengan konsentrasi larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Grafik disajikan dalam Gambar 6 dan 7.



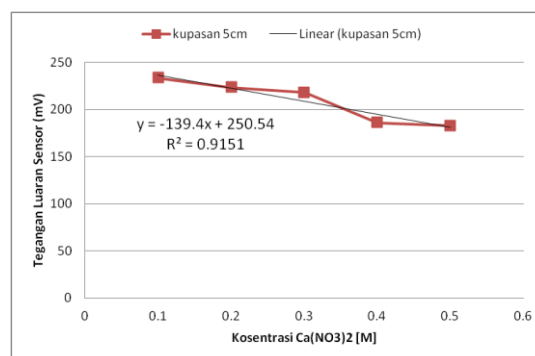
Gambar 6 Grafik hubungan V_{out} dan konsentrasi larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ untuk *sensor head* 2 cm

Tegangan luaran sensor V_{out} terhadap konsentrasi larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ untuk *sensor head* dengan panjang 2 cm pada Gambar 6 memberikan perbedaan yang kecil dari satu pengukuran konsentrasi terhadap lainnya. Hal ini disebabkan panjang *sensor head* 2 cm kurang memberikan efek rugi bocor cahaya yang melewati POF dibandingkan dengan yang memakai panjang 5 cm. Dengan alasan ini penulis selanjutnya memakai sensor POF dengan panjang *head* 5 cm.

Pada Gambar 7 diberikan hubungan antara tegangan luaran dengan konsentrasi larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ untuk *sensor head* 5 cm. Dari grafik di atas didapatkan persamaan (4) yang menunjukkan hubungan antara tegangan luaran terhadap konsentrasi untuk *sensor head* 5 cm

$$y = -139,4x + 250,54 \quad \dots\dots\dots (4)$$

Terlihat dari persamaan (4) tegangan luaran turun terhadap kenaikan konsentrasi larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$.



Gambar 7 Grafik hubungan V_{out} dan konsentrasi larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ untuk *sensor head* 5 cm

Terjadinya penurunan tegangan karena adanya cahaya bocor yang melalui sensor. Semula cahaya terpandu saat *cladding* belum dibuka. Setelah dibuka maka *cladding* yang semula berperan sebagai pemandu gelombang digantikan perannya oleh larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Hasil ini sesuai dengan hasil percobaan oleh Ho *et al.* (2012b) menggunakan larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ sebanyak sepuluh konsentrasi dengan kenaikan 50 μM yaitu dari 50 μM sampai 500 μM .

Penulis hanya mengukur tegangan keluaran yang diterima oleh sensor POF karena tegangan masukan untuk semua konsentrasi adalah sama. Hal ini akan setara dengan percobaan yang dilakukan Ho *et al.* (2012b). Hasil yang didapat penulis sesuai dengan yang didapat oleh Ho *et al.* (2012b) yaitu menunjukkan bahwa kenaikan konsentrasi larutan berbanding terbalik dengan penurunan tegangan luaran sensor. Hal ini juga sesuai dengan hasil studi karakteristik POF oleh Venkatasubbaiah *et al.* (2013).

2.3 Validasi Sensor

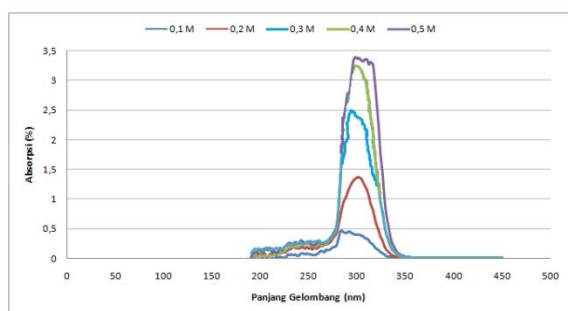
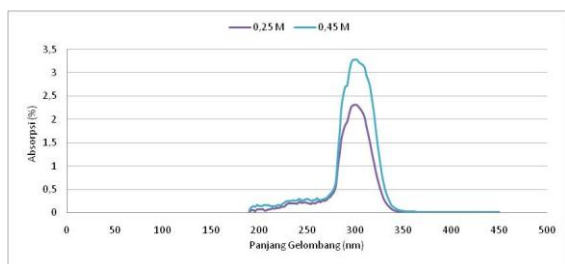
Proses validasi sensor yang telah dibuat dilakukan dengan cara pemakaian sensor untuk pendeteksian konsentrasi sampel larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ yaitu 0,25M dan 0,45M. Dengan menggunakan persamaan (4) didapat hasil prediksi sensor untuk pendeteksian konsentrasi diberikan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan konsentrasi $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ antara prediksi sensor dan riil

Konsentrasi Riil [M]	Tegangan V_{out}	Prediksi Regresi [M]	Selisih
0,25	211,2	0,282	0,032
0,45	184,2	0,476	0,026

2.2 Pengujian Absorpsi UV-Vis

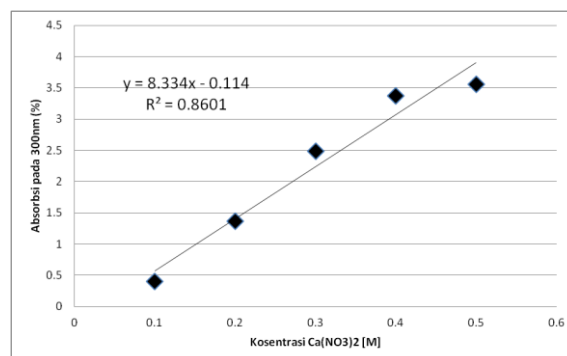
Sebagai langkah pembandingan antara pendeteksian yang telah dilakukan oleh sensor maka dilakukan uji absorpsi UV-Vis dengan alat Thermo Scientific GENESYS 105S dari larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ dengan konsentrasi 0,1M, 0,2M, 0,3M, 0,4M dan 0,5M sebagai kalibrasi untuk penggambaran grafik hubungan antara absorpsi (%) terhadap konsentrasi. Juga dilakukan uji absorpsi untuk larutan uji $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0,25M dan 0,45M. Hasil uji absorpsi larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0,1M, 0,2M, 0,3M, 0,4M dan 0,5M pada rentang panjang gelombang 200 – 500 nm diberikan dalam Gambar 8 sedangkan untuk konsentrasi 0,25M dan 0,45M diberikan dalam Gambar 9.

Gambar 8. Hubungan absorpsi dan konsentrasi larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ kalibrasi pada panjang gelombang 200-500nm.Gambar 9 Grafik absorpsi terhadap dua macam konsentrasi uji larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

Jika dilakukan pengamatan pada Gambar 8 terdapat puncak-puncak absorpsi untuk masing-masing konsentrasi. Puncak tersebut mengarah simetri pada panjang gelombang 300 nm. Karenanya, kita ambil untuk puncak pada panjang gelombang 300 nm adalah nilai absorpsi tertinggi ion logam Ca^{2+} dalam larutan air. Hasilnya kita dapat membuat grafik hubungan antara absorpsi terhadap konsentrasi larutan kalsium nitrat.

Hubungan tersebut diberikan dalam Gambar 10. Dari Gambar 10 didapatkan persamaan yang menyatakan hubungan antara absorpsi dan konsentrasi

$$y = 8,334x - 0,114 \quad (5)$$

Gambar 10 Grafik hubungan absorpsi terhadap konsentrasi larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ rentang 0,1 – 0,5M.

2.3 Perbandingan Hasil Prediksi Sensor POF dan UV-Vis

Dari hasil pengujian konsentrasi dengan menggunakan UV-Vis dan sensor serat optik POF yang telah dibuat, diberikan hasil perbandingan seperti pada Tabel 3. Dari tabel terlihat bahwa masing-masing UV-Vis maupun sensor dapat digunakan untuk memprediksi konsentrasi larutan dalam bermacam konsentrasi. Hasil perbandingan disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2 Perbandingan prediksi konsentrasi antara sensor dan UV-Vis

Konsentrasi [M]	Prediksi UV-Vis	Prediksi Sensor POF
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0,25	0,267	0,282
0,45	0,419	0,476

Dari Tabel 2 terlihat UV-Vis maupun sensor POF yang telah dibuat keduanya dapat digunakan untuk mendeteksi konsentrasi ion logam Ca^{2+} dalam air.

III. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Dari serangkaian penelitian terkait rancang bangun sensor pendeteksi konsentrasi logam dalam larutan yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan bahwa sensor POF Autonics FTP-320-10 dengan cahaya masukan LED merah BM1331 650 nm dan receiver fototransistor BPT1331 dapat digunakan untuk memprediksi konsentrasi ion logam dalam larutan. Hasil penelitian menunjukkan semakin naik konsentrasi larutan akan semakin menurunkan nilai tegangan luaran sensor. Hasil

pendeteksian konsentrasi ion logam Ca^{2+} dalam larutan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ untuk konsentrasi 0,25M dan 0,45M masing-masing didapat selisih sebesar 0,017M dan 0,031M.

Saran

Pada penelitian selanjutnya, disarankan peneliti melakukan analisis terkait pengaruh penggunaan jenis serat optik POF yang berbeda, pengaruh panjang *sensor head* terhadap ketelitian prediksi konsentrasi, juga konsentrasi molar dengan step dan jangkauan yang berbeda. Pemilihan sumber cahaya transmitter untuk LED dapat diganti dengan LED hijau dan LED ungu hingga diperoleh panjang gelombang yang berbeda bergantung warna LED. Juga disarankan untuk mencoba sumber *surface* LED dan penerima jenis fototransistor yang lain.

Ucapan Terima Kasih

Penulis berterimakasih kepada Dirjen Dikti Kemendiknas yang telah menyediakan dana beasiswa BPPS hingga seluruh biaya studi dan penelitian artikel ini telah terliput dalam komponen biaya program studi.

IV. DAFTAR PUSTAKA

- Autonics, 2013. FTP-320-10 Datasheet.
- Borecki, M., 2007. Intelligent Fiber Optic Sensor for Estimating the Concentration of a Mixture-Design and Working Principle. *Sensors* 7, 384–399. doi:10.3390/s7030384
- Chaudhari, A.L., Shaligram, A.D., 2012. Fiber Optic Sensor For The Measurement Of Concentration And Refractive Index Of Liquids Based On Intensity Modulation. *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.* 06, 589–593. Doi:10.1142/S2010194512003820
- Ebbing, D., Gammond, S., 2009. *General Chemistry*, 9th ed. Houghton Mifflin Company, Boston.
- El-Sherif, M., Bansal, L., Yuan, J., 2007. Fiber Optic Sensors For Detection of Toxic and Biological Threats. *Sensors* 7, 3100–3118. doi:10.3390/s7123100
- Ho, T.C., Jafri, M.Z.M., San, L.H., Chong, M.Y., 2012a. Detection of heavy metal ions in aqueous solution using fiber optic sensor, in: 2012 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). Presented at the 2012 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), pp. 267–270. doi:10.1109/ICCCE.2012.6271193
- Ho, T.C., Jafri, M.Z.M., San, L.H., Chong, M.Y., 2012b. Detection of heavy metal ions in aqueous solution using fiber optic sensor, in: 2012 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). Presented at the 2012 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), pp. 267–270. doi:10.1109/ICCCE.2012.6271193
- Ishtaiwi, M., 2014. Innovative Low-Cost Plastic Optical Fiber Sensors for Gas Monitoring. *MDPI*, p. b004. doi:10.3390/ecsa-1-b004
- Morisawa, M., Muto, S., 2012a. Plastic Optical Fiber Sensing of Alcohol Concentration in Liquors. *J. Sens.* 2012, e709849. doi:10.1155/2012/709849
- Morisawa, M., Muto, S., 2012b. Plastic Optical Fibre Sensing of Fuel Leakage in Soil. *J. Sens.* 2012, e247851. doi:10.1155/2012/247851
- Morisawa, M., Uchiyama, K., Vishnoi, G., Muto, S., Liang, C.X., Machida, E., Kiso, K., 1999. Improvement of sensitivity in plastic optical fiber gasoline leakage sensors. pp. 175–182. doi:10.1117/12.339794
- Peters, K., 2011. Polymer optical fiber sensors—a review. *Smart Mater. Struct.* 20, 013002. doi:10.1088/0964-1726/20/1/013002
- POF_review.pdf, n.d.
- Polishuck, P., 2006. *Plastic Optical Fibers Branch Out*.
- Venkatasubbaiah, C., Sreeharibabu, V., Kumar, A.J., Chandralingam, S., 2013. Study of Characterization of Intensity Modulated Fiber Optic Sensor. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2, 1454 – 1460.
- Yellow Stone Corp, 2012. BPT-BP1331 Datasheet.
- Yellowstone, 2012. BIR-BM1331 Datasheet.
- Ziemann, Krauser, Zamzow, Daum, 2001. *POF Handbook - Optical Short Range Transmission Systems*, 2nd ed. Springer.